

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日
Date of Application:

2002年 8月29日

出 願 番 号
Application Number:

特願2002-251905

[ST.10/C]:

[JP2002-251905]

出 願 人
Applicant(s):

株式会社半導体理工学研究センター

2003年 1月14日

特 許 庁 長 官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田信一郎

出証番号 出証特2002-3105600

【書類名】 特許願

【整理番号】 1024255

【提出日】 平成14年 8月29日

【あて先】 特許庁長官 太田 信一郎 殿

【国際特許分類】 G01N 23/00

【発明の名称】 陽電子を利用した欠陥評価装置

【請求項の数】 17

【発明者】

 【住所又は居所】 茨城県つくば市春日2丁目36番地3-202

 【氏名】 上殿 明良

【発明者】

 【住所又は居所】 東京都八王子市めじろ台2-37-6

 【氏名】 小椋 厚志

【特許出願人】

 【識別番号】 396023993

 【氏名又は名称】 株式会社半導体理工学研究センター

【代理人】

 【識別番号】 100077517

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 石田 敬

 【電話番号】 03-5470-1900

【選任した代理人】

 【識別番号】 100092624

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 鶴田 準一

【選任した代理人】

 【識別番号】 100087871

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 福本 積

【選任した代理人】

【識別番号】 100082898

【弁理士】

【氏名又は名称】 西山 雅也

【選任した代理人】

【識別番号】 100081330

【弁理士】

【氏名又は名称】 樋口 外治

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 036135

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9903088

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 陽電子を利用した欠陥評価装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 陽電子を発生する線源と前記陽電子を低速化するためのモデレーターを有する線源部と、前記線源部から試料保持部まで陽電子を輸送する輸送部と、被測定試料を保持する試料保持部と、前記被測定試料から放出される γ 線を検出する検出手段を具備する欠陥評価装置において、前記線源部内に後記保護手段がなければ前記線源を熱的に損傷する恐れがある位置に前記モデレーターを加熱する加熱手段を有し、かつ、前記加熱手段を用いて前記モデレーターを加熱する際に前記加熱手段及び加熱されている前記モデレーターから前記線源を保護する保護手段を有することを特徴とする欠陥評価装置。

【請求項 2】 前記モデレーターを介して低速化された陽電子を前記試料に入射させるときには、前記保護手段を前記モデレーターと前記線源間の外に配置させ、前記モデレーターを前記加熱手段により加熱するときには、前記保護手段を前記モデレーターと前記線源間に配置させることを特徴とする請求項 1 記載の欠陥評価装置。

【請求項 3】 前記加熱手段により前記モデレーターを加熱するときに、前記加熱手段が前記モデレーターに対向することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の欠陥評価装置。

【請求項 4】 前記モデレーターがモデレーター保持手段に保持されており、前記モデレーター保持手段と前記保護手段とが一体に構成され、前記モデレーターを介して低速化された陽電子を前記試料に入射させるときには、前記モデレーターが前記線源に対向し、そして前記モデレーターを前記加熱手段により加熱するときには、前記モデレーターが前記加熱手段に対向するとともに前記保護手段が前記線源に対向することによって前記加熱手段及び前記モデレーターの両方からの熱的攻撃に対して前記線源が保護されることを特徴とする請求項 1 ～ 3 のいずれか 1 項に記載の欠陥評価装置。

【請求項 5】 前記モデレーターがモデレーター保持手段に保持されており、前記モデレーター保持手段と前記保護手段とが L 字型体に一体に構成され、当

該L字型体を回転移動させて前記モデレーター又は前記保護手段を前記線源に対向させることが可能であり、前記モデレーターを前記加熱手段により加熱するときには、前記モデレーターが前記加熱手段に対向するとともに前記保護手段が前記線源に対向することによって前記加熱手段及び前記モデレーターの両方からの熱的攻撃に対して前記線源が保護されることを特徴とする請求項3記載の欠陥評価装置。

【請求項6】 前記陽電子を前記試料に入射させるときの前記線源から前記モデレーターへの陽電子の軌道に垂直な軸線回りに前記モデレーターを回転させて前記モデレーターを前記加熱手段に対面できることを特徴とする請求項1～5のいずれか1項に記載の欠陥評価装置。

【請求項7】 前記モデレーターを前記加熱手段により加熱するために前記モデレーターを回転させる際には、前記モデレーターが回転可能であるように前記モデレーターから前記線源を移動させ、次いで前記加熱手段を前記モデレーターに対向させ、そして前記モデレーターを前記加熱手段により加熱後、前記モデレーターを介して低速化された陽電子を試料に入射させるために前記モデレーターを回転させる際には、前記モデレーターが回転可能であるように前記モデレーターから前記加熱手段を移動させ、次いで前記加熱手段に前記モデレーターを対向させるための可動手段とをさらに具備する請求項4～6のいずれか1項に記載の欠陥評価装置。

【請求項8】 前記モデレーターが、タングステン、ニッケル及びイリジウムから選ばれる材料から成ることを特徴とする請求項1～7のいずれか1項に記載の欠陥評価装置。

【請求項9】 前記モデレーターが薄膜状モデレーターであるか、もしくは平行リボン型モデレーターであるか、又は薄膜状モデレーターと平行リボン型モデレーターとの組み合わせから選ばれることを特徴とする請求項1～8のいずれか1項に記載の欠陥評価装置。

【請求項10】 前記モデレーターが薄膜状モデレーターと平行リボン型モデレーターの組み合わせから選ばれ、前記平行リボン型モデレーターの装着間隔をDとし、前記平行リボン型モデレーターの幅をWとすると、 $D/W = 0.3 \sim$

1. 2であることを特徴とする請求項9記載の格子欠陥評価装置。

【請求項11】 前記モデレーターを前記加熱手段により加熱するときに、前記モデレーターを2000～2500℃の間の温度に加熱することを特徴とする請求項1～10のいずれか1項に記載の欠陥評価装置。

【請求項12】 前記加熱手段が電子ビーム発生装置である請求項1～11のいずれか1項に記載の欠陥評価装置。

【請求項13】 前記電子ビーム発生装置が、当該電子ビーム発生装置から放出される電子ビームを前記モデレーターに選択的に照射することをさらに特徴とする請求項12記載の欠陥評価装置。

【請求項14】 前記検出手段が前記陽電子の消滅により発生した γ 線を検出する2つの γ 線検出器から構成され、かつ、これら2つの γ 線検出器が前記試料を挟んで対向して配置されており、これら2つの γ 線検出器により検出された各 γ 線の検出タイミングを測定するとともに、これら2つの γ 線検出器により同時に検出された2本の γ 線について前記試料に入射したある1つの陽電子の消滅によって反対方向に同時に放出された2本の γ 線であるかを検査する回路に前記2つの γ 線検出器が接続されていて、前記試料に入射した陽電子の消滅によって反対方向に同時に放出され前記2つの γ 線検出器により検出された γ 線のエネルギースペクトルを測定することを特徴とする請求項1～13のいずれか1項に記載の欠陥評価装置。

【請求項15】 陽電子を発生する線源と前記陽電子を低速化するためのモデレーターを有する線源部と、被測定試料を保持する試料保持部と、前記線源部から前記試料保持部まで陽電子を輸送する輸送部と、前記被測定試料から放出される γ 線を検出する検出手段を具備する欠陥評価装置において、前記検出手段が前記陽電子の消滅により発生した γ 線を検出する2つの γ 線検出器から構成され、これら2つの γ 線検出器が前記試料を挟んで対向して配置されており、かつ、これら2つの γ 線検出器により検出された各 γ 線の検出タイミングを測定するとともに、これら2つの γ 線検出器により同時に検出された2本の γ 線について前記試料に入射したある1つの陽電子の消滅によって反対方向に同時に放出された2本の γ 線であるかを検査する回路に前記2つの γ 線検出器が接続されていて、

前記試料に入射した陽電子の消滅によって反対方向に同時に放出され前記 2 つの γ 線検出器により検出された γ 線のエネルギースペクトルを測定することを特徴とする欠陥評価装置。

【請求項 1 6】 前記輸送部が、磁界によりエネルギー弁別を行なうための曲線部と、バックグラウンドを下げるための直線部とから成ることを特徴とする請求項 1 ～ 1 5 のいずれか 1 項に記載の欠陥評価装置。

【請求項 1 7】 前記輸送部が、磁界によりエネルギー弁別を行なうための曲線部から成る請求項 1 ～ 1 5 のいずれか 1 項に記載の欠陥評価装置。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1 】

【発明の属する技術分野】

本発明は陽電子を利用する欠陥評価装置に関する。特に、本発明は、従来のものよりも小型で、かつ測定精度が改良された陽電子を利用する欠陥評価装置に関する。

【 0 0 0 2 】

【従来の技術】

近年、材料の電子構造や材料中に存在する格子欠陥の濃度や種類を外部から検出し評価する方法として、陽電子消滅の現象を利用する方法が注目されている。陽電子を試料に打ち込むと、陽電子は電子と対消滅して、主に 2 本の γ 線を放出する。陽電子の寿命や、陽電子消滅により放出された γ 線のエネルギー分布及び角度分布を測定し分析することによって、材料の格子欠陥や電子構造を研究することができる。

【 0 0 0 3 】

陽電子消滅の現象を利用する方法の特徴としては、格子欠陥、特に空孔型格子欠陥に対する感度が高いこと、欠陥あるいはバルクの電子状態の研究が可能であること、非破壊であること、また、試料温度や電気的特性など実験上制約となる条件が少ないことなどが挙げられる。従って、陽電子消滅を利用した分析法はバルク材料の評価に適しており、金属、半導体、高分子などの様々な材料の評価に用いられてきた。一方、陽電子のエネルギーを制御することができれば、陽電子

を打ち込む深さを任意に選ぶことができ、陽電子消滅を材料の表面近傍の研究に適用することができる。この手法は、1980年代から急速に発展し、材料の表面近傍の評価手法として注目されている。

【0004】

陽電子消滅法以外にも、電子スピン共鳴（ESR）、光吸収や各種の電氣的測定法などを用いて欠陥を分析することにより様々な材料の研究が成されているが、どの方法も欠陥の種類を直接同定することはできない。これに対し、陽電子消滅法は観測している欠陥の種類が原子空孔型であることを直接的に示すことができる。これがこの方法の際立った特徴である。

【0005】

さらに陽電子消滅法は、添加元素、伝導度、欠陥の荷電状態（ただし、正に荷電した欠陥は検出しない）に依らず空孔型欠陥の検出に使い、陽電子消滅法は単空孔、複空孔の検出に有効である。例えばGe、Si、GaAs、InP、InSbなど種々の半導体の完全結晶、単空孔、複空孔でのそれぞれの陽電子寿命の大略は原子1個当りの体積にほぼ比例（価電子密度に逆比例）する。もちろん陽電子寿命値の詳細は空孔の荷電状態、格子緩和などにも依存するが、その大略値がこのような単純なパラメーターで与えられることは空孔の検出手段として優れている。

【0006】

以下に陽電子消滅を利用する格子欠陥検出の原理を示す。

陽電子は、放射性同位元素の β^+ 崩壊、あるいは高エネルギー光子からの陽電子・電子対生成によって供給される。一般的に使用される β^+ 崩壊型の放射性同位元素としては、 ^{22}Na （半減期：2.6年）、 ^{58}Co （70.8日）、 ^{64}Cu （12.7時間）、 ^{11}C （20.4分）、 ^{13}N （10分）などがある。 β^+ 崩壊からの陽電子は、最大エネルギーが0.5MeV～2MeV程度の連続スペクトルを有する。また、電子リニアックなどで加速された100MeV程度のエネルギーを有する電子を重金属ターゲットに当てて制動放射により高強度ガンマ線を発生させ、そしてこの高強度ガンマ線が重金属ターゲットを通過することによって、電子と陽電子を対生成させることができる。この場合、対生成される陽電子のエネル

ギーは、最大値が電子の加速エネルギー程度まで広がった連続エネルギースペクトルを示す。陽電子源としては、一般的に β^+ 壊変型の放射性同位体が用いられる。例えば、 ^{22}Na は、半減期が長く、入手および取り扱いが比較的容易であるために、 $^{22}\text{NaCl}$ 等の形態で線源として使用される。 $^{22}\text{NaCl}$ は、通常、非常に薄いチタン箔等のカプセルに封入され、後述するように線源ホルダーに保持された形態で使用される。

【0007】

陽電子は、材料に入射すると、イオン化やフォノンの励起などにより急速に運動エネルギーを失い、格子との熱平衡に達する。この熱平衡状態になる過程は熱化と呼ばれ、 10^{-12} 秒程度で熱化する。熱化した陽電子は、電子と対消滅するまでの間、その材料中を拡散する。熱化した陽電子が、電子と対消滅するまでの時間は $10^{-10} \sim 10^{-7}$ 秒程度であり、対消滅によって約511 keVのエネルギーを有する2本の γ 線を放出する。陽電子は、熱化してから電子と対消滅するまでの拡散過程で、クーロン相互作用のためにその材料を構成している原子核からの反発力を受ける。そのため、完全結晶中では、陽電子は格子間位置に存在し、金属であれば内殻電子よりも伝導電子と、半導体であれば内殻電子よりも価電子と消滅しやすい。また、空孔型欠陥が存在する場合には、陽電子は、格子間位置よりも空孔型欠陥に捕獲されやすいため、陽電子はいったん空孔型欠陥に捕獲された後、電子と対消滅しやすい。そのため、陽電子が材料に入射してから電子と対消滅するまでの時間は、欠陥の濃度や欠陥の形態に応じて異なる。従って、陽電子が材料に入射してから対消滅するまでの時間、すなわち陽電子の寿命を求めることによって、材料中に存在する欠陥を評価することができる。

【0008】

図1に放射性同位元素(^{22}Na)から放出された陽電子が材料に入射して電子と対消滅する様子を示した。陽電子源として ^{22}Na を使用する場合、 ^{22}Na は、 β^+ 崩壊の際に1.28 MeVの γ 線を放出するため、この γ 線を陽電子が試料へ入射したことを示す信号として用いることができる。 ^{22}Na を用いて陽電子を発生させる場合、陽電子の発生と同時に発生した1.28 MeVの γ 線をまず検出した後、その陽電子が試料に入射して電子と対消滅することにより放出された約51

1 keVの γ 線を検出するまでの時間を計測する。1. 28 MeVの γ 線と約511 keVの γ 線を検出した時刻の差を測定することにより、陽電子の寿命スペクトルを得ることができる。

また、消滅前に電子が運動している場合には、対消滅の前後でエネルギーと運動量が保存されるため、 γ 線のエネルギー分布はドップラー効果により広がる。このため、消滅 γ 線のエネルギー分布を測定することにより、消滅相手の電子の運動量分布を測定できる。消滅 γ 線のエネルギー E_γ は、次式で示される。

【0009】

【数1】

$$E_\gamma = E_0 \left[1 \pm \frac{v}{2c} \cos \theta \right] \quad (\text{式1})$$

【0010】

ここで、 v は電子の速度、 c は光速、 θ は γ 線と電子の運動方向のなす角、また、 $E_0 = mc^2 = 511 \text{ keV}$ である（ m は電子の静止質量）。陽電子と消滅した電子の運動量の γ 線の放出方向に沿った成分を P_L とすると式1は次のように変形できる。

【0011】

【数2】

$$E_\gamma = mc^2 \pm \frac{c P_L}{2} = mc^2 \pm \Delta E \quad (\text{式2})$$

【0012】

式2から、511 keVを中心とするエネルギーの広がり、電子の運動量成分に対応することがわかる。

ドップラー広がり程度の程度は、現在最高水準の検出器を使用したとしても、その分解能の2～3倍程度でしかないので、一般的に、ドップラー広がり全体のカウント数に対する中央部のカウント数の比をSパラメーターとして、ドップラー広がりの変化を評価する。ドップラー広がり先鋭化するほど、Sパラメーター

の値は大きくなる。

【 0 0 1 3 】

図 2 には金属を例にとり、陽電子が空孔型欠陥に捕獲される様子を示した。図 2 (a) に示すように、バルク中では、前述のように陽電子は原子核からクーロン相互作用による反発力を受けるため格子間位置に存在する。一方、図 2 (b) に示すように、空孔型欠陥が存在すると、陽電子が欠陥中に局在する確率が高くなる。上述の通り、消滅 γ 線ドップラー広がりには消滅相手の電子の運動量分布を反映するが、欠陥中では、運動量分布の広い内殻電子との消滅確率がバルクのそれに比較して低下するので、ドップラー広がりには先鋭化する。よって、S パラメーターは増大する。図 2 (c) に示すように、空孔型欠陥の空隙サイズが大きくなると、この傾向はさらに大きくなる。この S パラメーターの大きさを求めることにより空孔型欠陥の濃度及び種類を評価することができる。また、空孔型欠陥中では、電子の密度はバルクの電子密度よりも低くなるので、陽電子寿命は長くなる。

従って、消滅 γ 線のドップラー広がり測定することにより主に電子の運動量分布を求めることができ、陽電子消滅位置付近の電子状態についての評価を行なうことができ、陽電子寿命の測定により主に消滅位置での空孔型欠陥の評価を行なうことができる。また、これらの手法を用いて、空孔と不純物の複合欠陥を評価することができる。

【 0 0 1 4 】

このような陽電子消滅の現象を利用した従来の欠陥評価装置は、当該技術分野で周知であり、例えば特開平 7 - 2 7 0 5 9 8 号公報に記載されている。

特開平 7 - 2 7 0 5 9 8 号公報に記載されている陽電子発生装置は、陽電子を発生させるための線源部と、線源部で発生した陽電子を低速化するモデレーター（減速材とも呼ばれる）と、前記モデレーターで減速された陽電子ビームを試料部に導く輸送部と、線源部付近に設置される遮蔽部と、陽電子を加速するための加速部と、陽電子ビームを補正するためのビーム位置微調整部と、高速の陽電子や電子を除去するための分別部と、パルスビームを直流化するための直流化部と、陽電子を試料に当てて消滅 γ 線を検出するための半導体検出器が配設された試

料部から構成される。この陽電子発生装置は、放射性同位元素を複数個並べ、モデレーターの構造を湾曲状にすることにより多量の陽電子を集束させることを可能にするとともに、メンテナンス時に放射性同位元素から発生する陽電子や γ 線を遮蔽する遮蔽板とモデレーター焼鈍用の赤外線発生装置を陽電子発生装置内に設けることによりメンテナンス時の被曝を減少できるようにしたものである。

【 0 0 1 5 】

【発明が解決しようとする課題】

陽電子を用いて被測定材料の表面近傍の格子欠陥を精度良く評価するには、低速でエネルギー分布の揃った陽電子を用いる必要がある。このような低速でエネルギー分布の揃った陽電子を得るために、通常、上記のような ^{22}Na 等の β^+ 崩壊する放射性同位元素から放出されたエネルギー分布の大きい高エネルギー（0～0.5 MeV）の陽電子をモデレーターと呼ばれるタングステン（W）等の金属に入射させ、モデレーター中で非弾性散乱を生じさせることによってエネルギーを失わせてから真空中に取り出すことが行なわれている。効率良く目的の陽電子を得るためにモデレーターに求められる条件は、欠陥が少ないことと表面が清浄であることである。一般的に、モデレーターは、長時間使用すると、モデレーター内に格子欠陥が発生するため、定期的に焼鈍する必要がある。さらに、陽電子を用いる欠陥評価装置では、陽電子が発生してから被測定試料に達するまでの放射性同位元素、モデレーター、被測定試料を包含する陽電子の全経路が同一真空中に存在する必要がある。

【 0 0 1 6 】

従来、欠陥が少なく表面が清浄なモデレーターを得るために、モデレーターを欠陥評価装置内に形成された真空中から取り出して典型的には2000～2500℃の高温で加熱することによる焼鈍が行なわれていた。しかしながら、この作業を行なう場合、焼鈍後、モデレーターを陽電子発生装置に組み込むまでに、モデレーターを空気中で台座に取り付ける等による衝撃などが原因で、モデレーターに欠陥が発生することは避けられず、また、欠陥評価装置に組み込み再度真空にするまでの間に大気中の汚染物がモデレーターの表面に吸着することを避けることができなかった。また、欠陥評価装置から取り出すことなくモデレーターを

焼鈍する場合でも、その焼鈍温度が高温なため、焼鈍の際に発生する熱から線源や、測定に要するその他の機器、真空容器等を保護する必要があったことから、線源からモデレーターを実質的に引き離す機構や線源等を熱的に保護する機構を設けなければならず、装置が大規模化することが避けられなかった。

特に、線源として放射性同位元素を使用し、欠陥評価装置から取り出すことなくモデレーターを焼鈍する場合に、放射能漏れが生じてはならず、また、線源の熱による変性などが生じることも望ましくないため、線源を熱的に保護する必要がある。電子リニアックにより加速した高エネルギー電子を重金属ターゲットに当てて制動放射により高強度ガンマ線を発生させ、そしてその高強度ガンマ線が重金属を透過する際に発生した高エネルギー陽電子を利用する欠陥評価装置でも、重金属ターゲット、重金属ターゲットを保持する他の部品（熱に弱い絶縁部品など）が、モデレーター焼鈍時に温度上昇するのを防ぐ必要がある。

【 0 0 1 7 】

さらに、モデレーターの焼鈍に使用される従来の加熱装置として、特開平 7 - 2 7 0 5 9 8 号公報に記載されているような赤外線を利用するものがあったが、格子欠陥濃度を低くするために必要な典型的には 2 0 0 0 ~ 2 5 0 0 ℃ の高温でモデレーターを均一に加熱するには不十分であった。

また、陽電子を利用する従来の欠陥評価装置では、一般的に小型化するとノイズレベルが増大して信号対ノイズ（S/N）比が低下するという欠点があった。

【 0 0 1 8 】

本発明は、かかる従来技術の欠点を鑑みて成されたものであり、本発明の 1 つの目的は、モデレーターを欠陥評価装置から取り出さずに焼鈍に必要な高温に加熱することができ、モデレーター表面を清浄に保つことのできる欠陥評価装置を提供することである。

本発明のもう 1 つの目的は、陽電子を利用する欠陥評価装置内の線源等に及ぼすモデレーター加熱時の熱の影響を最低限に抑えることである。

本発明のもう 1 つの目的は、陽電子を利用する欠陥評価装置を、その測定精度を犠牲にせず小型化することである。

【 0 0 1 9 】

本発明のもう 1 つの目的は、陽電子を利用する欠陥評価装置において、低速陽電子の発生効率を向上させることである。

本発明のもう 1 つの目的は、陽電子を利用する欠陥評価装置のメンテナンス頻度を減少させて被曝量を減少させることである。

本発明のもう 1 つの目的は、陽電子を利用する欠陥評価装置の S / N 比を向上させることである。

本発明のさらにもう 1 つの目的は、陽電子を利用する従来の欠陥評価装置よりも小型でありながらも S / N 比が向上した欠陥評価装置を提供することである。

【 0 0 2 0 】

【課題を解決するための手段】

本発明は、1 つの側面において、陽電子を発生する線源と前記陽電子を低速化するためのモデレーターを有する線源部と、前記線源部から試料保持部まで陽電子を輸送する輸送部と、被測定試料を保持する試料保持部と、前記被測定試料から放出される γ 線を検出する検出手段を具備する欠陥評価装置において、前記線源部内に後記保護手段がなければ前記線源を熱的に損傷する恐れがある位置に前記モデレーターを加熱する加熱手段を有し、かつ、前記加熱手段を用いて前記モデレーターを加熱する際に前記加熱手段及び加熱されている前記モデレーターから前記線源を保護する保護手段を有することを特徴とする欠陥評価装置を提供する。

【 0 0 2 1 】

本発明は、もう 1 つの側面において、モデレーターを介して低速化された陽電子を試料に入射させるときには、上記の保護手段をモデレーターと線源間の外に配置させ、モデレーターを加熱手段により加熱するときには、上記の保護手段をモデレーターと線源間に配置させることを特徴とする欠陥評価装置を提供する。

【 0 0 2 2 】

本発明は、もう 1 つの側面において、加熱手段によりモデレーターを加熱するときに、当該加熱手段がモデレーターに対向することを特徴とする欠陥評価装置を提供する。

【 0 0 2 3 】

本発明は、もう 1 つの側面において、モデレーターがモデレーター保持手段に保持されており、モデレーター保持手段と上記保護手段とが一体に構成され、モデレーターを介して低速化された陽電子を試料に入射させるときには、モデレーターが線源に対向し、そしてモデレーターを加熱手段により加熱するときには、モデレーターが加熱手段に対向するとともに上記保護手段が線源に対向することによって加熱手段及びモデレーターの両方からの熱的攻撃に対して線源が保護されることを特徴とする欠陥評価装置を提供する。

【 0 0 2 4 】

本発明は、もう 1 つの側面において、モデレーターがモデレーター保持手段に保持されており、モデレーター保持手段と保護手段とが L 字型体に一体に構成され、当該 L 字型体を回転移動させてモデレーター又は保護手段を線源に対向させることが可能であり、モデレーターを加熱手段により加熱するときには、モデレーターが加熱手段に対向するとともに上記保護手段が線源に対向することによって加熱手段及びモデレーターの両方からの熱的攻撃に対して線源が保護されることを特徴とする欠陥評価装置を提供する。

【 0 0 2 5 】

本発明は、もう 1 つの側面において、陽電子を発生する線源と陽電子を低速化するためのモデレーターを有する線源部と、被測定試料を保持する試料保持部と、線源部から試料保持部まで陽電子を輸送する輸送部と、被測定試料から放出される γ 線を検出する検出手段を具備する欠陥評価装置において、検出手段が陽電子の消滅により発生した γ 線を検出する 2 つの γ 線検出器から構成され、これら 2 つの γ 線検出器が試料を挟んで対向して配置されており、かつ、これら 2 つの γ 線検出器により検出された各 γ 線の検出タイミングを測定するとともに、これら 2 つの γ 線検出器により同時に検出された 2 本の γ 線について試料に入射したある 1 つの陽電子の消滅によって反対方向に同時に放出された 2 本の γ 線であるかを検査する回路に 2 つの γ 線検出器が接続されていて、試料に入射した陽電子の消滅によって反対方向に同時に放出され 2 つの γ 線検出器により検出された γ 線のエネルギースペクトルを測定することを特徴とする欠陥評価装置を提供する。

【 0 0 2 6 】

本発明によって、陽電子を利用する欠陥評価装置の体積が従来のものに比べて約十分の一になり、また、陽電子強度が数倍に向上する。陽電子強度が数倍向上するために、測定感度が数倍向上し、測定に要する時間が数分の一になる。さらに、真空を破ってメンテナンスする頻度が約十分の一になるために、放射性同位元素を扱う機会、すなわち被曝量も十分の一になる。

【 0 0 2 7 】

【発明の実施の形態】

図 3 に、放射性同位元素を利用した磁場収束型の低速陽電子ビームラインの概念図を示す。ビーム強度は、使用される放射性同位元素の線源強度によるが、このタイプの場合、 $10^5 \text{e}^+/\text{s}$ 程度であることが多い。線源部チャンバー 3 1 0 内には、陽電子を放出する放射性同位元素 3 1 2 と放射性同位元素 3 1 2 を保持する線源ホルダー 3 1 3 と放射性同位元素 3 1 2 から放出された陽電子を低速化するためのモデレーター 3 1 1 が設けられる。放射性同位元素 3 1 2 から放出された陽電子は、モデレーター 3 1 1 に入射し、低速陽電子へ変換される。モデレーター 3 1 1 から放出された低速陽電子は、磁場と電場により試料方向へ引き出される。線源部チャンバー 3 1 0 と試料部チャンバー 3 3 0 の間には、高エネルギー陽電子と低速陽電子を分離して低速陽電子だけを試料部チャンバー 3 3 0 に運ぶためのエネルギー弁別器 3 2 0 が設けられる。エネルギー弁別の手法として、磁場により陽電子ビームを例えば 45° 程度の角度で曲げるか、電場と磁場により軌道を変える手法（ $E \times B$ フィルター）が一般的である。エネルギー弁別を行った後、低速陽電子を任意のエネルギーに加速するため、加速管 3 2 1 に電圧をかける。任意のエネルギーに加速された陽電子を、試料 3 3 1 に入射させる。試料 3 3 1 から放出された消滅 γ 線のエネルギー分布を半導体検出器 3 4 0 で測定する。3 2 2 は、陽電子を輸送するための磁場を生じさせるためのコイルである。線源部では、多量の γ 線、X 線、 β 線等の放射線が発生するので、そのような放射線が測定を行なう際のバックグラウンドノイズになるのを防ぐために、図 3 には示されていないが、通常、鉛等で形成された遮蔽体を線源部チャンバー 3 1 0 付近に配置する。また、高エネルギー陽電子による消滅 γ 線が線源に到達する

のを防ぐために、エネルギー弁別器 3 2 0 と加速管 3 2 1 の周りにも同様の遮蔽体を配置する。

図示していないが、陽電子の寿命を測定する場合には、通常、陽電子をパルス化装置を使用して 1 0 0 ピコ秒程度の非常に短いパルスにした後、試料に入射させる。パルス化装置のタイミングパルスと、 γ 線検出器で検出した消滅 γ 線の時間差を測定することにより陽電子の寿命が求められる。

【 0 0 2 8 】

図 4 (a) 及び (b) に、本発明の欠陥評価装置の一実施態様における、低速陽電子を発生させるときとモデレーターを焼鈍するときの線源とモデレーターと加熱手段の配置を示す。図 4 (a) は、線源 4 0 2 で発生した陽電子をモデレーター 4 0 3 により低速化させるときの概要図であり、図 4 (b) は、モデレーター 4 0 3 を加熱手段 4 0 5 により焼鈍するときの概要図である。図 4 (a) 及び (b) において、モデレーター 4 0 3 はモデレーター保持手段 4 0 4 に保持されており、線源 (放射性同位元素) 4 0 2 とモデレーター 4 0 3 を加熱して焼鈍するための加熱手段 (電子ビーム発生装置) 4 0 5 はいずれもモデレーター 4 0 3 の近傍に配置されている。低速陽電子を発生させるときには、モデレーターと線源との間隔は典型的には 1 mm 以下である。図 4 (a) 及び (b) に示されているモデレーター保持手段 4 0 4 は、その 1 つの態様として L 字型の形状を有する。このように L 字型の形状を有する場合に、モデレーター保持手段 4 0 4 に、モデレーター 4 0 3 を焼鈍する際にモデレーター 4 0 3 及び加熱手段 4 0 5 から発生する熱から線源 4 0 2 を保護するための保護手段の機能も持たせることができる。モデレーター保持手段 4 0 4 に接続されたモデレーター可動手段 (図示せず) によって、モデレーター 4 0 3 を加熱する際に、モデレーター 4 0 3 を加熱手段に対向させることができる。モデレーター 4 0 3 を加熱する際にモデレーター 4 0 3 及び加熱手段 4 0 5 から発生する熱から少なくとも線源 4 0 2 等が保護される限り、モデレーター保持手段 4 0 4 は他の形態をとってもよい。加熱手段 4 0 5 として電子ビーム発生装置を使用する場合に、電子ビーム発生装置からの電子ビームのまれや散乱による熱の影響も最低限に抑えられるという観点から、モデレーター保持手段が L 字型の形状を有するとともに、図 4 (b) に示されている

ようにモデレーター加熱時に加熱手段405と線源402との間にモデレーター保持手段405を配置させることは、非常に有効である。加熱手段405として電子ビーム発生装置を使用する場合に、図4(b)に示されている態様では、電子ビーム発生装置が陽電子の軌道方向にほぼ垂直な向きでモデレーター403と対向しているが、モデレーター403を加熱する際にモデレーター403及び電子ビーム発生装置から発生する熱並びに電子ビーム発生装置からの電子ビームのもれや散乱による熱の影響から少なくとも線源402等が保護される限り、図4(a)及び(b)に示されているような配置に限定されない。モデレーター保持手段404を形成するのに有用な材料としては、焼鈍温度に耐えられる耐熱性の高いものであればよく、タンタル、タングステン、モリブデン等が挙げられる。

【0029】

図4(a)において、線源402は、紙面手前側から見て、モデレーター403の右側に位置し、高エネルギーの陽電子がモデレーター403に入射してモデレーター403内部で減速され、低速陽電子となってモデレーター403から放出される。モデレーター403に電圧をかけている場合には、モデレーター403により低速化された陽電子は、次に、その電圧に応じたエネルギーに加速され試料方向に輸送される。

【0030】

図4(b)において、加熱手段405はモデレーター403の下方にモデレーター403と対向して配置されており、電子ビーム発生装置を加熱手段405として使用する場合に、電子ビーム発生装置から放出された電子ビームはモデレーター403を所定の温度に加熱する。電子ビーム発生装置を加熱手段405として使用した場合に、電子ビーム発生装置は、モデレーター403と対向した状態で、欠陥評価装置内の線源や他の機器への熱による悪影響を最低限に抑えつつ、モデレーター403の焼鈍に適切な温度にモデレーター403を集中的かつ均一に加熱することができる。モデレーター403としてタングステンを使用した場合の典型的な焼鈍温度は約2000～2500℃の間の温度である。例えば、モデレーター403を、10分程度で適切な温度まで昇温し、数分間から10分間程度で焼鈍を行なうことができる。図4(a)及び(b)に示されているモデ

レータ保持手段404は、加熱手段405がモデレータ403を加熱して焼鈍する際に、モデレータ403及び電子ビーム発生装置から発生する熱並びに電子ビーム発生装置からの電子ビームのもれや散乱による熱の影響から少なくとも線源を保護するための保護手段としても作用し、モデレータ403を介して陽電子を試料に入射させるとき、すなわち低速陽電子を発生させるときには、モデレータ保持手段404は、モデレータ403と線源402間の外に配置させ、モデレータ403を焼鈍のために加熱するときにはモデレータ403と線源402間に配置させる。

【0031】

また、モデレータ保持手段と別個の保護手段を設け、陽電子をモデレータにより低速化した後に試料に入射させるときには、モデレータと線源の間の外まで保護手段を移動させ、モデレータを加熱するときにはモデレータと線源の間に保護手段を移動させることもできる。図4（a）及び（b）に示されているような形態では、前述のようにモデレータ保持手段404に保護手段としての機能も持たせることができる。このようにモデレータと保護手段をL字型に一体的に形成した場合に、モデレータを加熱手段に対向するように移動させるとともに、保護手段をモデレータと線源の間に移動させることができるため、線源部チャンバーがよりコンパクトになり、欠陥評価装置を小型化することができる。

【0032】

モデレータと線源と加熱手段とは、例えば、図4（a）に示されているようにモデレータを介して低速陽電子を発生させた後、モデレータを加熱するとき、モデレータ403から放出される低速陽電子の軌道に垂直な軸線回りにモデレータ保持手段404をモデレータ403とともに回転させてモデレータ403と加熱手段405を対向させることができる。そのような、回転は、例えば回転導入端子を使用して行なうことができる。

図4（a）及び（b）には示していないが、上記のようにモデレータを介して低速化された陽電子を試料に入射させた後、モデレータを加熱手段により加熱するためにモデレータを回転させる際には、モデレータが回転可能である

ようにモデレーターから線源を移動させ、次いで加熱手段をモデレーターに対向させ、そしてモデレーターを加熱手段により加熱後、モデレーターを介して低速化された陽電子を試料に入射させるためにモデレーターを回転させる際には、モデレーターが回転可能であるようにモデレーターから加熱手段を移動させ、次いで加熱手段にモデレーターを対向させるための可動手段を線源とモデレーター保持手段及び加熱手段の少なくとも1つに連結し、線源とモデレーターと加熱手段の位置を調整できる。これらの可動手段としては、例えば直線導入端子及び回転導入端子が挙げられる。

【0033】

本発明の欠陥評価装置は、一実施態様において、例えば、図5（a）及び（b）に示されているようなモデレーター可動手段504を使用してモデレーター保持手段502及びモデレーター501を陽電子の軌道に垂直な軸線回りに回転させることができる。図5（a）は、本発明の欠陥評価装置の一実施態様における、線源部チャンバー内でモデレーター及びモデレーター保持手段を支持する機構を例示するものであり、図5（b）は、本発明の一実施態様における、低速陽電子を発生させる際の、陽電子の軌道に平行な方向で線源から見た、モデレーター保持手段502と、モデレーター501と、モデレーター可動手段504の配置を示す概略図である。図5（a）において、モデレーター保持手段502は、モデレーター保持手段502を支持するための支持手段503及びモデレーター保持手段を低速陽電子の軌道方向に垂直な軸線回りに回転させるための回転板505を介してモデレーター可動手段504に連結されている。モデレーター501が回転するには、例えば、図5（a）において、モデレーター可動手段504が回転板505をその軸線回りに回転させるものでなければならないが、モデレーター可動手段504自体がその軸線にそって移動することもできる。

【0034】

図5（b）において、モデレーター保持手段502の下方にモデレーターを焼鈍するための加熱手段（電子ビーム発生装置）506が配置されている。実際には、加熱手段506は、モデレーター501を焼鈍するために、モデレーター501をモデレーター可動手段504により回転したときに、モデレーター501

と対向するような位置に配置される。図 5 (b) において、5 0 3 はモデレーター保持手段 5 0 2 を支持するための支持手段であり、モデレーター可動手段 5 0 4 は陽電子の軌道に垂直な軸線回りに回転する回転板 5 0 5 を有する。この回転板の回転軸線回りにモデレーター保持手段 5 0 2 を回転させることができ、それに伴ってモデレーター 5 0 1 を回転させることができる。図 5 (b) に示した態様では、陽電子の軌道方向と電子ビーム発生装置 5 0 6 の電子ビーム放出方向はほぼ垂直になるが、前述のようにモデレーターを焼鈍するときにモデレーター 5 0 1 の加熱及び電子ビーム発生装置自体の加熱並びに電子ビーム発生装置からの電子ビームのもれや散乱による熱から線源（図示せず）が保護される限り、他の配置をとることもできる。

【 0 0 3 5 】

上記のような直線導入端子等の可動手段を使用することによって、線源部チャンバー内の所定の位置に放射性同位元素を挿入することができ、また、放射性同位元素を取り扱う際の被爆量を少なくすることができる。さらに、モデレーターを焼鈍するときには、そのような可動手段を用いて線源をモデレーターから引き離すことによって、モデレーターの焼鈍の際に線源の温度が上昇するのをさらに防止できる。そのような可動手段を使用して、線源の位置を微調整することもできる。モデレーターや加熱手段にも、そのような可動手段を設けてそれらの位置を微調整することもできる。

【 0 0 3 6 】

実際には、モデレーターは、厚みが $1\ \mu\text{m}$ 程度と非常に薄いことから、何らかの保持手段によって保持されているため、モデレーター保持手段が焼鈍の際の熱から線源を保護する保護手段としても機能する場合には、モデレーターとそのような保護手段とが一体に構成されていると考えることができる。そのようなモデレーター保持手段を回転及び／又は移動させてモデレーターを線源に対向させることが可能であり、モデレーターを加熱手段により加熱するときには、モデレーターが加熱手段に対向するとともに保護手段が線源に対向することによって加熱手段及びモデレーターの両方からの熱的攻撃に対して線源を保護することができる。

【 0 0 3 7 】

これらモデレーター保持手段と保護手段がL字型体に一体に構成されている場合には、モデレーターを焼鈍のために加熱するときには、加熱手段がモデレーターに近接しており、モデレーターを介して低速陽電子を発生させるときには、モデレーターが線源に近接していることが好ましいため、モデレーターを加熱手段により加熱するためにモデレーターを回転させる際には、モデレーターが回転可能であるようにモデレーターから線源を移動させ、次いで加熱手段をモデレーターに対向させ、そしてモデレーターを加熱手段により加熱後、モデレーターを介して低速化された陽電子を試料に入射させるためにモデレーターを回転させる際には、モデレーターが回転可能であるようにモデレーターから加熱手段を移動させ、次いで加熱手段にモデレーターを対向させるための、位置を微調整する可動手段が、モデレーター、線源及び加熱手段に連結されていることが好ましい。

【 0 0 3 8 】

次に、図6を参照してモデレーターの別の態様を例示する。図6は、モデレーターが薄膜状のタングステンと複数の平行なりボン状のタングステンの組み合わせから成る場合の1つの例を示すものである。複数のリボン状のタングステン603が、それらの面内方向が陽電子の軌道方向とほぼ平行になり、かつ、それらの長手方向が陽電子の軌道方向に垂直になるようにリボン支持手段604に所定の間隔で平行に設けられた複数のスリットに挟持される。図6に示されている態様において、リボン支持手段604とモデレーター保持手段601の間に薄膜状タングステン602が挟持される。リボン支持手段604は、モデレーター保持手段601にビス等の常用の固定手段により固定することができる。リボン支持手段604とさらに別の態様において、図示されていないが、モデレーターの構成要素としてメッシュ状のタングステンを、陽電子の軌道方向を法線とする平面内に存在し、かつ陽電子の軌道を横切るように別の支持手段を使用して設置することができる。例えば、図6において、紙面手前側から見てリボン状タングステン603の左側に、メッシュ状のタングステンを設置することができる。図6は、薄膜状タングステンとリボン状タングステンの組み合わせを例示するものであるが、薄膜状タングステンを単独で使用しても、複数の平行なりボン状タングス

テンを使用してもよい。タングステン以外にも、モデレーターとして適切な材料で作られた薄膜状モデレーター、リボン状モデレーター、または薄膜状モデレーターとリボン状モデレーターの組み合わせから選ばれるモデレーターを使用することができる。しかしながら、モデレーターとして図 6 に示したような薄膜状タングステン 6 0 2 と平行に並べた複数のリボン状タングステン 6 0 3 の組み合わせを使用すると、薄膜状タングステン 6 0 3 を単独でまたは平行に並べた複数のリボン状タングステンを使用した場合よりも、モデレーターからの低速陽電子の放出効率が低いことが見出された。特に、タングステンリボンの装着間隔、すなわち隣り合う平行なタングステンリボン間の間隔を D とし、タングステンリボンの幅、すなわち陽電子の軌道方向に平行な方向のタングステンリボンの寸法を W とすると、 $D/W = 0.3 \sim 1.2$ の場合に低速陽電子の発生効率が高くなり、 $D/W = 0.4 \sim 1.0$ の場合に発生効率がより高くなり、 $D/W = 0.6 \sim 0.8$ の場合に発生効率がさらにいっそう高くなることを見出された。

薄膜状タングステン 6 0 2 の厚さ並びにリボン状タングステン 6 0 3 の寸法は必要に応じて変えることができる。タングステン薄膜の厚さは典型的には約 1 マイクロメートル程度であり、モデレーターの直径、すなわちモデレーター保持手段の開口部の直径は、例えば 10 mm 程度であるが、薄膜状タングステン及びリボン状タングステン等のモデレーターを構成する要素のサイズ並びにモデレーターの直径は、他の任意の値をとりうる。モデレーターの材料としては、負の仕事関数を有するために高エネルギー陽電子を熱化して表面に放出することのできる常用のものを使用でき、タングステン以外にも、例えばニッケル、イリジウム等の他の材料を使用できる。

【 0 0 3 9 】

モデレーターは、加熱手段及び線源に対して、例えば、図 5 (b) に示した配置で焼鈍することができる。

これまで提案されたモデレーターの焼鈍のための機構としては、前述のように加熱手段として赤外線発生装置を使用し、別個の加熱チャンバーを設け、その中でモデレーターを焼鈍するものがあった。そのように別個の加熱チャンバー内でモデレーターの焼鈍を行なう場合には、モデレーターを線源近傍から加熱チャン

バー内に移送する手段が必要であり、その結果、装置が大規模になることは避けられない。

【 0 0 4 0 】

本発明の欠陥評価装置では、その1つの態様において、電子ビーム発生装置の電子ビーム放出口の口径をモデレーターの直径にほぼ等しくし、モデレーターを焼鈍する際に、電子ビーム発生装置の電子ビーム放出口がモデレーターに近接し、かつモデレーターと対向するように、電子ビーム発生装置とモデレーターを配置する。このようにすると、線源や装置内の他の機器に悪影響を及ぼさずに、モデレーターを所望の焼鈍温度に集中的かつほぼ均一に加熱することができる。電子ビーム発生装置を使用してモデレーターを加熱する場合には、モデレーターと電子ビーム発生装置の陰極との間に電位差を生じさせる。

【 0 0 4 1 】

モデレーターを焼鈍するにあたって、一定の焼鈍効果を達成するには、上記のようにモデレーターを均一に所定の焼鈍温度に加熱することが望ましい。また、モデレーター周囲の線源や他の機器への熱による悪影響を最低限に抑えるという観点から、モデレーターを集中的に加熱することが望ましい。従って、電子ビーム発生装置を使用してモデレーターを焼鈍するときに、電子ビーム発生装置をモデレーターに近接させて電子ビームをモデレーターに集中的かつほぼ均一に照射することが好ましい。

【 0 0 4 2 】

本発明の欠陥評価装置の一実施態様において使用できる電子ビーム発生装置の陰極に設けられるフィラメントとしては、いかなる形態のものも使用できるが、ほぼ平行にそろった電子ビームを放出するものが、電子ビーム発生装置をモデレーターに近接させて焼鈍を行なう場合に、モデレーターを集中的かつ均一に所定の焼鈍温度に加熱できると同時に線源や他の機器に及ぼす熱の影響を最低限に抑えることができるという観点から好ましい。そのようなフィラメントとしては、例えば高速反射電子線回折（R H E E D）用の電子ビーム発生装置で使用されるフィラメントが挙げられる。R H E E D用の電子ビーム発生装置で使用されるフィラメントは市販されている。R H E E D用の電子ビーム発生装置で使用される

フィラメントは一般的に、その形状やバイアス電圧等の様々な因子に依存するが、ほぼ平行にそろった電子ビームをモデレーターに入射させることができる。

【 0 0 4 3 】

図 7 に、本発明の欠陥評価装置に使用される電子ビーム発生装置の一例の略断面図を示す。電子ビーム発生装置 7 1 0 の電子ビームが放出される開口部 7 1 2 の直径は、モデレーターの直径に応じて変えることができるが、開口部 7 1 2 の直径をモデレーターの直径にほぼ等しくし、開口部 7 1 2 をモデレーターに近接させるとともに対向させることによって、線源や他の機器に悪影響を及ぼさずにモデレーターを所定の焼鈍温度に加熱することができる。7 1 1 は電子ビームを放出するフィラメントである。本発明に係る欠陥評価装置では、電子ビームの収束性や平行性は、モデレーターの直径、モデレーター焼鈍時の電子ビーム発生装置とモデレーターの間隔、並びに電子ビーム発生装置の電気的特性等の様々な因子に依存すると考えられるため、電場レンズ等のレンズを使用して電子ビーム発生装置から放出される電子ビームの収束性や平行性を調節し、モデレーターを所定の焼鈍温度に均一に加熱することもできる。そのような電子ビームの収束性や平行性を調節するためのレンズを使用しない場合にも、電子ビーム発生装置の電子ビーム放出口の口径をモデレーターの直径にほぼ等しくし、モデレーターを焼鈍するときに電子ビーム発生装置をモデレーターに近接させることによって、モデレーターを所定の焼鈍温度に均一に加熱することができる。しかしながら、本発明において、モデレーターを焼鈍するための加熱装置として電子ビーム発生装置を使用する場合に、電子ビームの収束性や平行性を調節するために電場レンズ等のレンズを使用することを排除するわけではない。

【 0 0 4 4 】

このような特徴を有するモデレーター焼鈍用の加熱装置を線源部チャンバー内に組み込むことによって、陽電子を利用する欠陥評価装置の線源部チャンバーを小型化することができるとともに、線源や他の機器の望ましくない加熱を最低限に抑えることができ、また、モデレーターのメンテナンスの頻度を大幅に減少させることができるため作業者の被曝量も大幅に減少できる。モデレーター焼鈍用の加熱装置としては、上記のような電子ビーム発生装置が好ましいが、モデレー

ターを焼鈍に必要な温度に均一に加熱できる限り、赤外線発生装置等の他の加熱装置の使用を排除するわけではない。また、電子ビームのスポット径は、一般的に、電子ビーム発生装置のフィラメント等の形状やバイアス電圧等の様々な因子を変化させることにより調節できるため、必ずしもモデレーター焼鈍時に電子ビーム発生装置がモデレーターに近接していなくてもよいが、電子ビーム発生装置がモデレーターにより近接しているほうが、電子ビームのスポット径が広がらずモデレーターの焼鈍を適切に行なうことができる。本発明の欠陥評価装置では、モデレーターを所定の焼鈍温度にほぼ均一に加熱することができるため、低速陽電子の放出効率を高めることができる。

【 0 0 4 5 】

従来、赤外線加熱装置を使用した場合には、可能な加熱温度はせいぜい 9 0 0 ℃程度であったので、モデレーターを焼鈍するための加熱装置としては、上記のような電子ビーム発生装置が好ましい。しかしながら、本発明の欠陥評価装置において、モデレーターを所望の焼鈍温度に加熱できる限り、加熱手段は電子ビーム発生装置に限定されない。

【 0 0 4 6 】

次に、本発明に係る欠陥評価装置の一実施態様を、図 8 を参照して説明する。図 8 は、本発明に係る欠陥評価装置の一実施態様の全体を表した概略図である。欠陥評価装置 8 0 0 は、線源部チャンバー 8 0 1、エネルギー弁別を行うための曲線部 8 0 2、バックグラウンドノイズを減少させるための直線部 8 0 3、試料が保持されている試料チャンバー 8 0 4、及び試料チャンバー 8 0 4 に設置された γ 線検出器 8 0 5 から成る。線源部チャンバー 8 0 1 内には、図示されていないが、陽電子線源としての放射性同位元素と、線源で発生した陽電子を低速化するためのモデレーターと、モデレーターを加熱するための加熱装置が組み込まれている。また、図 8 には示されていないが、線源部チャンバーの周りに鉛等で形成された遮蔽手段を設置し、線源部チャンバー 8 0 1 内の放射性同位元素から放出される多量の γ 線等の放射線が測定時のバックグラウンドノイズとなることを妨げる。

【 0 0 4 7 】

超高真空を達成するために、例えば、線源部チャンバー 8 0 1 と試料チャンバー 8 0 4 に真空ポンプ 8 0 6 及び 8 0 7 が接続される。真空ポンプとしては、 10^{-8} Torr 程度の真空度を達成できるターボポンプを使用できる。低速陽電子実験の場合には、 10^{-7} Torr 程度の真空度を達成できれば十分である。陽電子を輸送するために、線源部チャンバー 8 0 1、曲線部 8 0 2 と直線部 8 0 3 から成る輸送部、及び試料チャンバー 8 0 5 に磁場を発生させるコイル（図示せず）を設置する。ビーム軌道の修正のために、曲線部手前に、ビーム水平方向および垂直方向にコイル（図示せず）を設置する。

【 0 0 4 8 】

本発明によれば、従来提案されていたような、モデレーターを焼鈍するための別個の加熱チャンバーを設けたり、そのような別個のチャンバーにモデレーターを導くための移動手段を設ける必要がないため、線源部チャンバーを大幅に小型化することができる。例えば、本発明の欠陥評価装置では、その設置面積を、 $2 \times 1.5 \text{ m}^2$ 程度に小さくすることができる。さらに、線源部の遮蔽をより厳密に行うことによって、または、後述するように 2 つの検出器を試料チャンバーに設置することによって、装置の直線部 8 0 3 を省略できるため、この装置全体のサイズをさらに小さくすることができ、その設置面積を、例えば $1.5 \times 1.5 \text{ m}^2$ 程度にすることができる。なお、陽電子を放出する線源として、本明細書では、放射性同位元素を主に例示するが、電子リニアックを用いて陽電子を発生させることを排除するわけではない。

【 0 0 4 9 】

同時計測ドップラー拡がり法

次に同時計測ドップラー拡がり（CDB, Coincidence Doppler Broadening）法について説明する。同時計測ドップラー拡がり法は、陽電子と電子の対消滅により放出された γ 線のエネルギー分布を、試料を挟んで対向する 2 つの γ 線検出器を使用して各 γ 線検出器の入力タイミングを測定し、両方の γ 線検出器で検出した γ 線放出の同時性を検査することにより、電子の運動量分布を決定する手法である。 γ 線検出器としては、常用の半導体検出器、例えば高純度 Ge 検出器を使用できる。この方法によると、特に、大きな運動量を持つ内殻電子の運動量分布

をより精密に決定することができる。この手法を使用すると、信号対ノイズ（S/N）比が向上し、本発明の欠陥評価装置をさらに小型化でき、設置面積をより小さくすることができる。同時計測ドップラー拡がり法を使用すると、例えば図 8 に示した本発明に係る欠陥評価装置を、図 9 に示すようにさらに小型化できる。欠陥評価装置 9 0 0 は、図 8 において 8 0 3 で示した直線部を持たず、試料が保持されている試料チャンバー 9 0 4 に接続された 2 つの γ 線検出器 9 0 4 及び 9 0 5 を具備する。これら 2 つの γ 線検出器は、試料を挟んで対向している。9 0 1 は線源部チャンバーであり、9 0 2 はエネルギー弁別を行うための曲線部である。9 0 6 はビームラインを超高真空にするための図 8 に関して説明したような真空ポンプである。

【 0 0 5 0 】

この同時計測ドップラー拡がりの測定原理を以下に説明する。

1. 同時計測ドップラー拡がりの測定原理

陽電子・電子対消滅により放出される 2 本の γ 線をそれぞれ、 γ_1 、 γ_2 と名づけ、それぞれのエネルギーを E_1 および E_2 とする。2 本の γ 線のエネルギーの和 $E_1 + E_2$ は以下の式で与えられる。

$$E_1 + E_2 = 2 m c^2 - E_B \quad (\text{式 3})$$

ここで、 m は電子の静止質量、 c は光速、 E_B は電子の束縛エネルギーである。

また E_1 及び E_2 それぞれは以下の式で与えられる。

$$E_1 = m c^2 - E_B / 2 + c p_L / 2 \quad (\text{式 4})$$

$$E_2 = m c^2 - E_B / 2 - c p_L / 2 \quad (\text{式 5})$$

ここで p_L は γ 線放出方向の陽電子・電子対の運動量成分である。 $c p_L / 2$ がドップラー拡がり成分である。式 4 及び式 5 より 2 本の γ 線のエネルギーの差は、

$$E_1 - E_2 = c p_L \quad (\text{式 6})$$

となる。式 6 より $E_1 - E_2$ を測定することにより、 p_L を決定できることがわかる。式の上では、式 3 と式 6 の連立方程式を解くことに対応する。図で示すと、測定した 2 本の γ 線のエネルギー分布を E_1 を縦軸、 E_2 を横軸にグラフ化し、2 本の直線が交わる点を取り出せば良い。この手法を図 1 0 に示した。

図 1 1 には実際に測定した同時計測ドップラー拡がりの鳥瞰図を示す。実際の

実験では、統計精度を上げるため、 $2 m c^2 - \Delta E < E_1 + E_2 < 2 m c^2 + \Delta E$ の条件 (ΔE は 1 ~ 2 keV) を満足する値を式 3 で示される直線に垂直な方向で積分する。

【 0 0 5 1 】

2. 同時計測ドップラー拡がり測定結果

図 1 2 に、同時計測ドップラー拡がり測定により得られたスペクトルと、通常ドップラー拡がり測定により得られたスペクトルを重ねたグラフを示す。同時計測ドップラー拡がり測定法によると、通常のドップラー拡がり測定法よりも S / N 比が 2 ~ 3 桁上昇する。このため、高運動量を持つ電子、すなわち内殻電子の情報がノイズに埋もれなくなり、材料の格子欠陥等についてのより精密な議論を行なうことができる。この同時計測ドップラー拡がり測定において使用した試料は、p 型シリコン [チョクラルスキー法により製造したシリコン、不純物としてホウ素 (B) を含有、前処理：希薄フッ酸 (HF) 処理] であった。測定は、室温、真空中 (1×10^{-6} Pa) で、陽電子打ち込みエネルギー 25 keV で行なった。

【 0 0 5 2 】

3. 測定装置及びデータ収集

測定装置は、 γ 線検出器を含む通常のドップラー拡がり測定法に使用する装置が 2 つ分とそれぞれの γ 線検出器の入力タイミングを測定し、 γ 線放出の同時性を検査するための回路からなる。

図 1 3 に測定装置のブロックダイアグラムを示す。高圧電源 1 及び 2 は、それぞれ半導体検出器に高圧を印加するための高圧電源である。半導体検出器 1 及び 2 の前置増幅器の出力をそれぞれ増幅器 1 及び 2 に入力し増幅する。増幅器 1 及び 2 のユニポーラ出力 (UNI) をアナログーデジタル変換器 (A-D 変換器) 1 及び 2 にそれぞれ入力し、アナログーデジタル変換する。同時性を検査するために、増幅器 1 及び 2 のバイポーラ出力 (BI) を利用する。ここで、増幅器 1 及び 2 はユニポーラ出力にディレイ回路が設けられており、バイポーラ出力により作られたデジタルパルスと、ユニポーラ出力のタイミングを取ることができる。バイポーラ出力を利用してエネルギー分析器 1 及び 2 によりそれぞれエネルギー

一分析を行なう。ここでは、約 5 1 1 keV に対応する γ 線が入力したときにのみゲート信号 (G a t e) を出すよう設定する。2 つのエネルギー分析機の出力を同時性分析器に入れ、同時性をチェックする。この際、増幅器 1 及び 2 により供給されたパイルアップ・リジェクターの信号 (P U R) も同時性分析器のアンチ・コインシデンス回路に入れることにより、パイルアップした信号を除去している。したがって、同時性分析器は、4 本の信号が同時であるときにのみ出力を与える。この出力を A-D 変換器 1 及び 2 へのゲート信号とする。データ収集はウィンドウズ (商標) ベースのコンピュータで行なうことができる。データ収集ボードは、A-D 変換器 1 及び 2 に接続され、A-D 変換器 1 及び 2 に入力される信号の波高分析を行なう。データ収集ボードはファスト・コムテック (FAST C OMTEC) 製の高速データ収集システムを使用した。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

図 1 は、陽電子線源 (^{22}Na) から放出された陽電子が電子と対消滅して γ 線を放出する過程の概要図である。

【図 2】

図 2 は、陽電子の空孔型欠陥による捕獲と、陽電子消滅 γ 線ドップラー拡がりの変化を示す概略図である。

【図 3】

図 3 は、従来の低速陽電子発生装置の概略図である。

【図 4】

図 4 (a) は、低速陽電子発生時の、本発明のモデレーターの配置を示す概略図であり、図 4 (b) は、モデレーター焼鈍時の、本発明のモデレーターの配置を示す概略図である。

【図 5】

図 5 (a) は、モデレーターとモデレーター可動手段の一実施態様を示した概略図である。図 5 (b) は、本発明の欠陥評価装置の一実施態様における、加熱装置として電子ビーム発生装置を使用した場合のモデレーターと線源と電子ビーム発生装置の配置を示す概略図であって、線源部チャンバー内で線源から陽電子

放出方向に見た概略図である。

【図 6】

図 6 は、本発明の欠陥評価装置の一実施態様において使用されるモデレーターの構造を示す概略図である。

【図 7】

図 7 は、本発明の欠陥評価装置の一実施態様において使用される電子ビーム発生装置を示す概略図である。

【図 8】

図 8 は、本発明の欠陥評価装置の一実施態様を示す概略図である。

【図 9】

図 9 は、同時計測ドップラー拡がり法を用いて格子欠陥評価を行なう際の、本発明の欠陥評価装置の一実施態様を示す概略図である。

【図 1 0】

図 1 0 は、同時計測ドップラー拡がり法により γ 線放出方向の陽電子・電子対の運動量成分 p_L を決定する際に用いるグラフである。

【図 1 1】

図 1 1 は、実際に求められた同時計測ドップラー拡がり法を用いて得られたスペクトルの鳥瞰図を示す。このスペクトルの縦軸は γ 線カウント数の対数である。

【図 1 2】

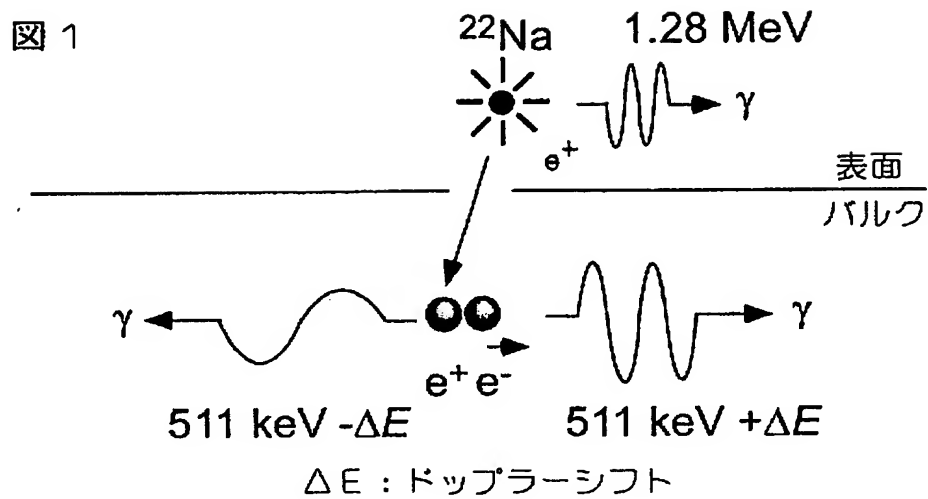
図 1 2 は、同時計測ドップラー拡がり法を用いて得られたスペクトルと、通常のドップラー拡がり法を用いて得られたスペクトルを示すグラフ図である。

【図 1 3】

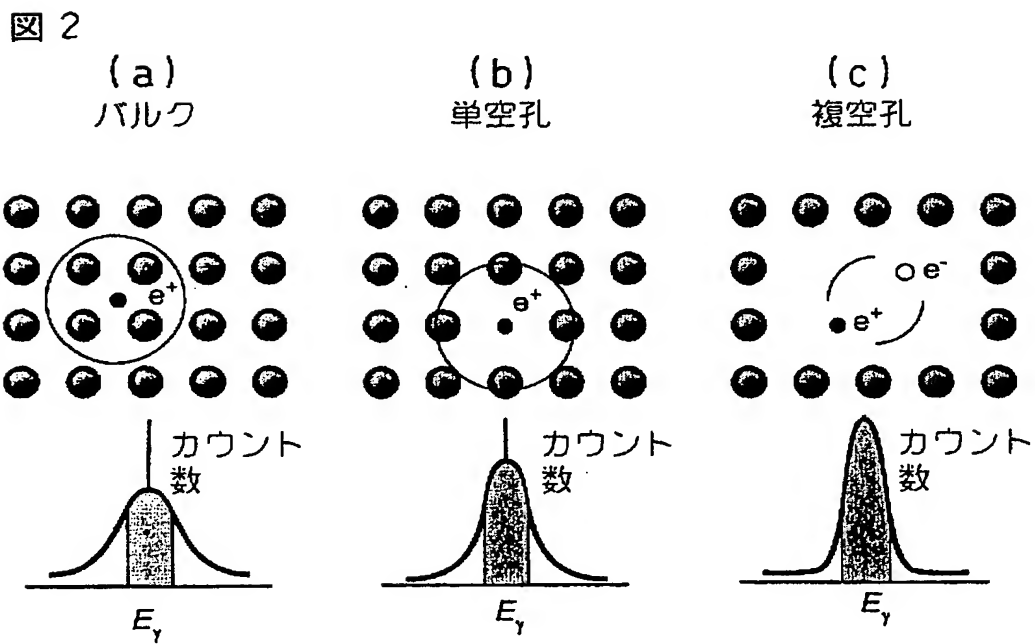
図 1 3 は、同時計測ドップラー拡がり法のブロックダイアグラム図である。

【書類名】 図面

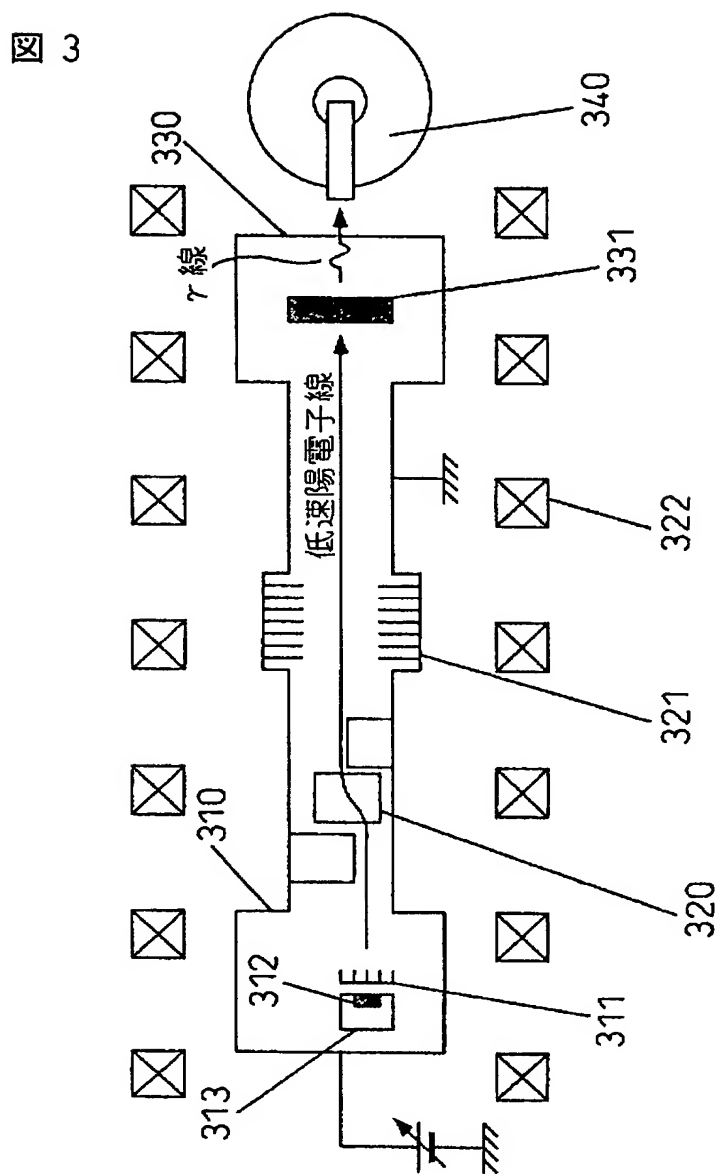
【図 1】



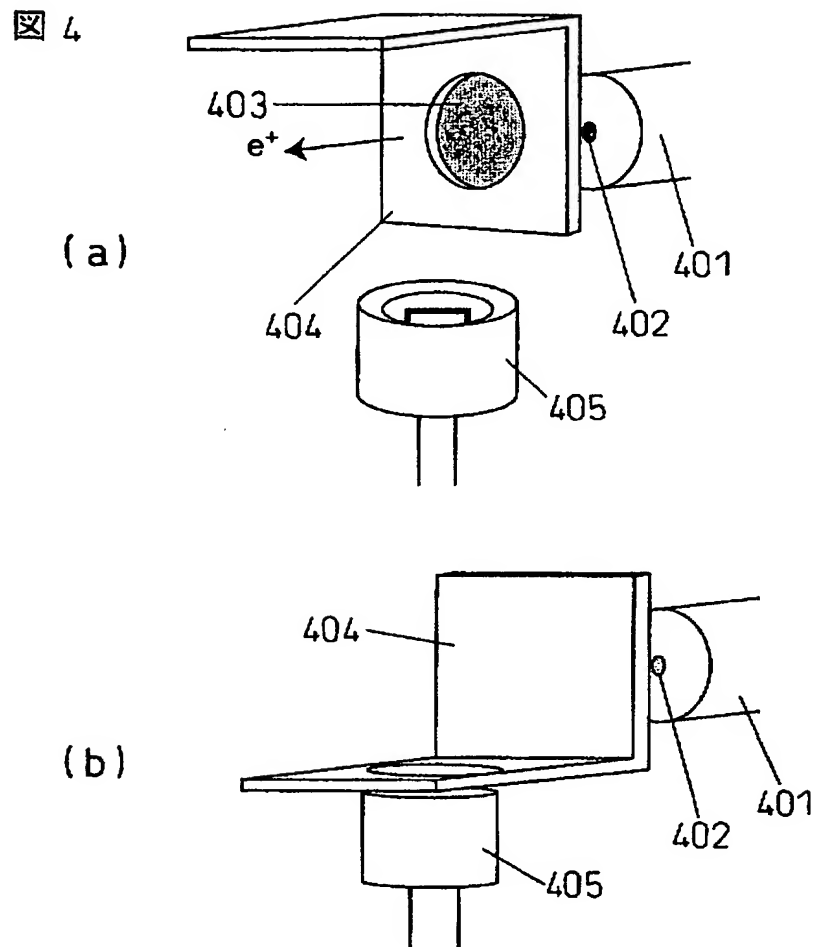
【図 2】



【図 3】

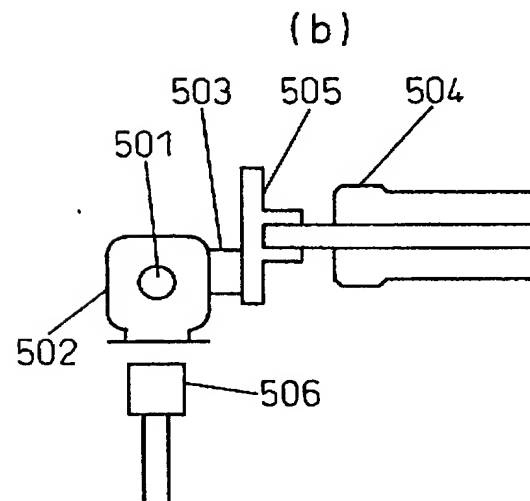
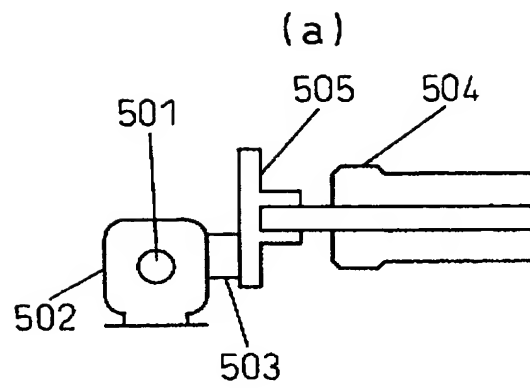


【図4】

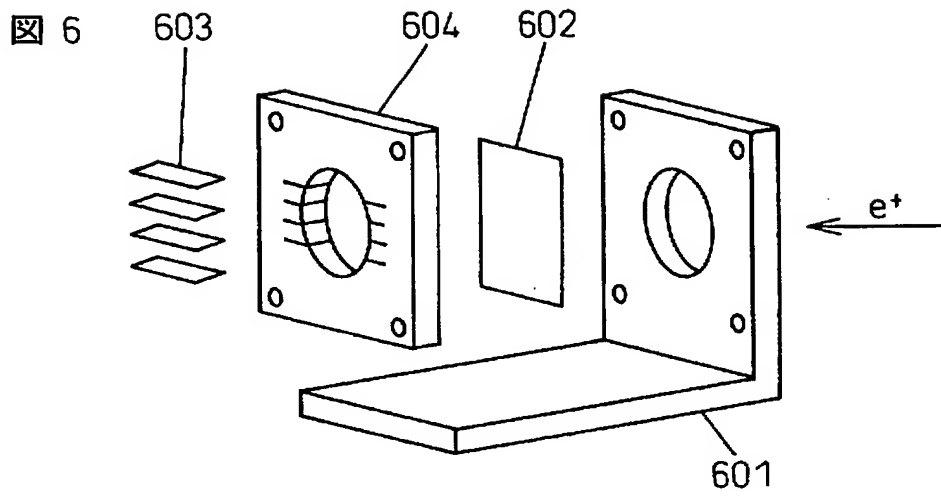


【図 5】

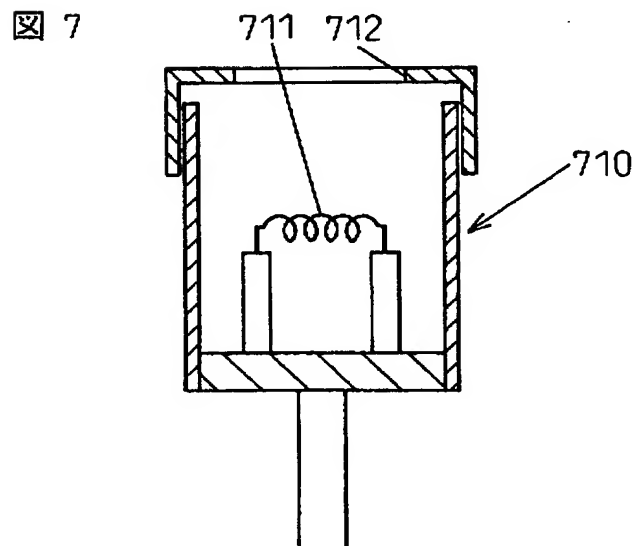
図 5



【図 6】

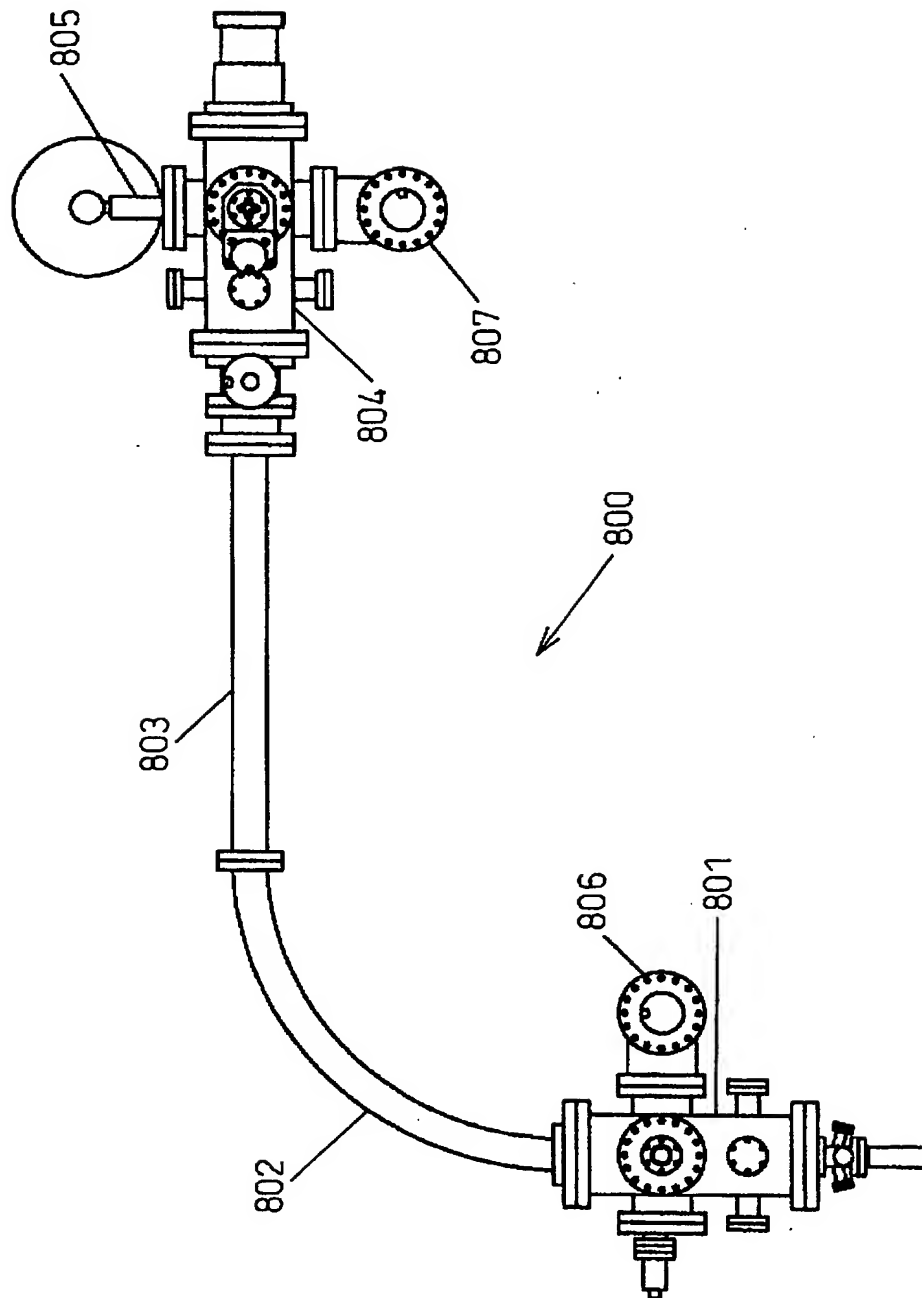


【図 7】



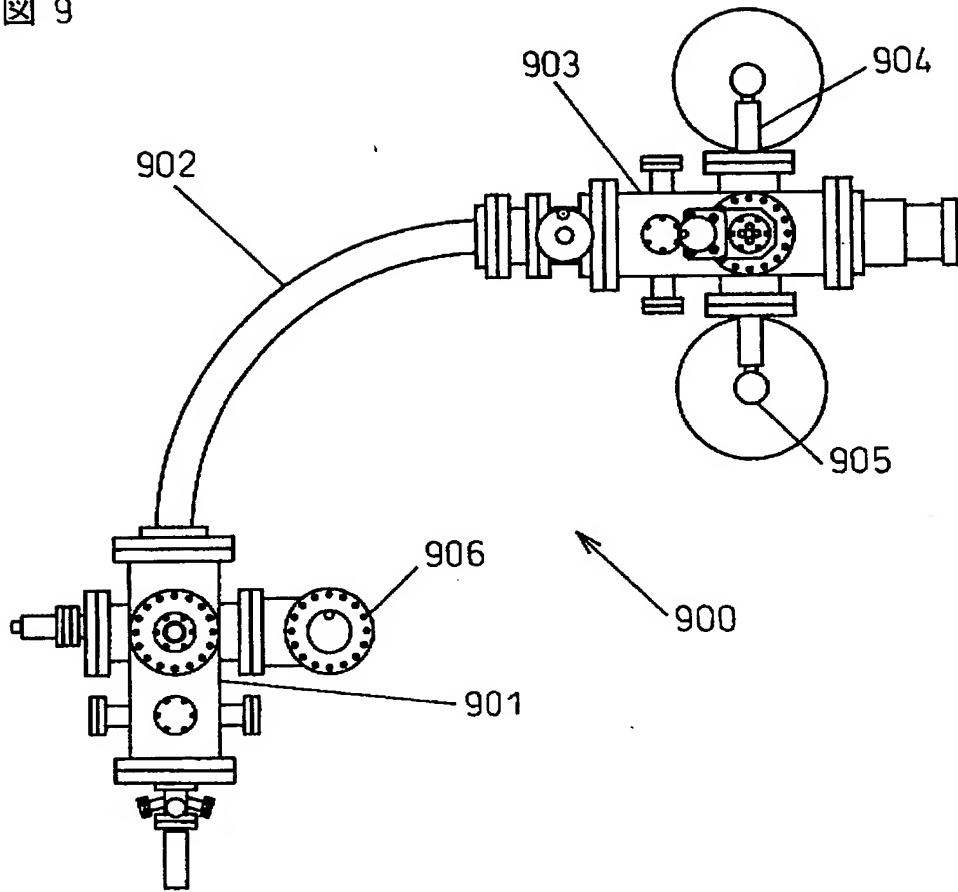
【図 8】

図 8



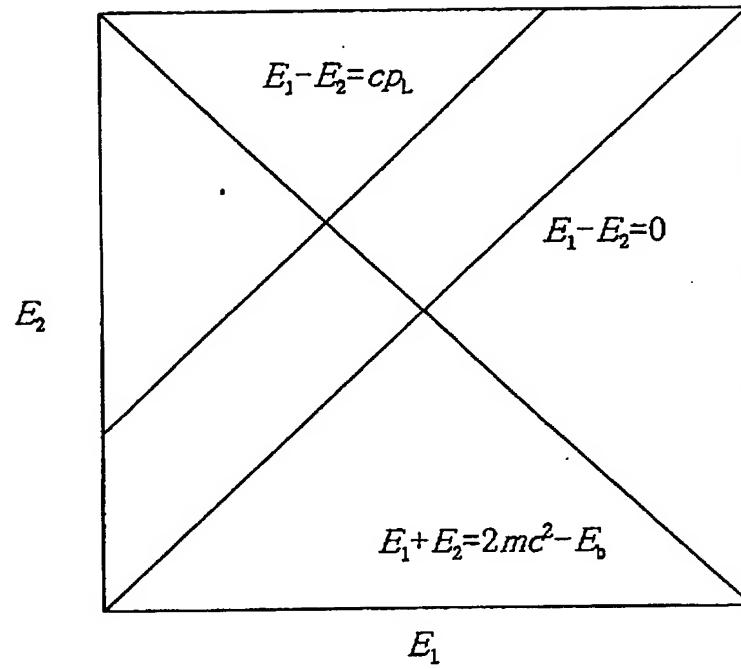
【図 9】

図 9



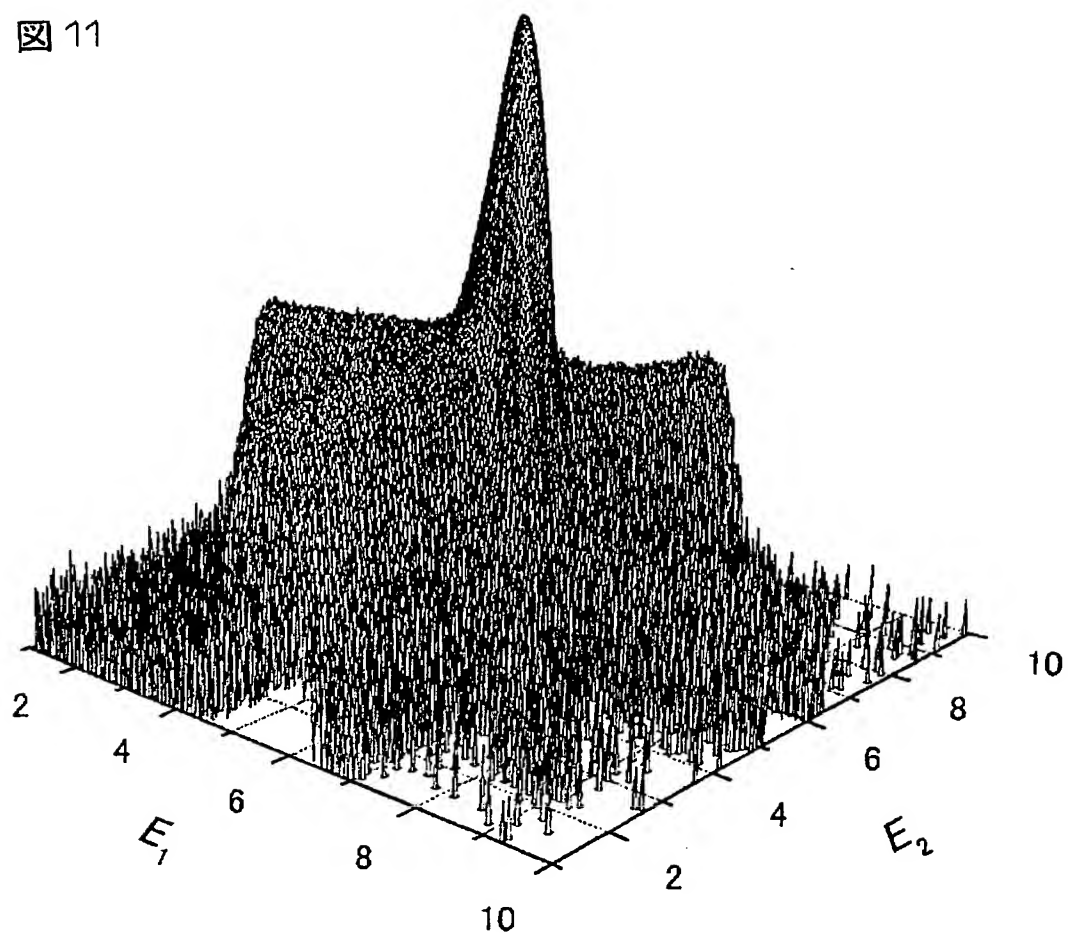
【図 1 0】

図 10



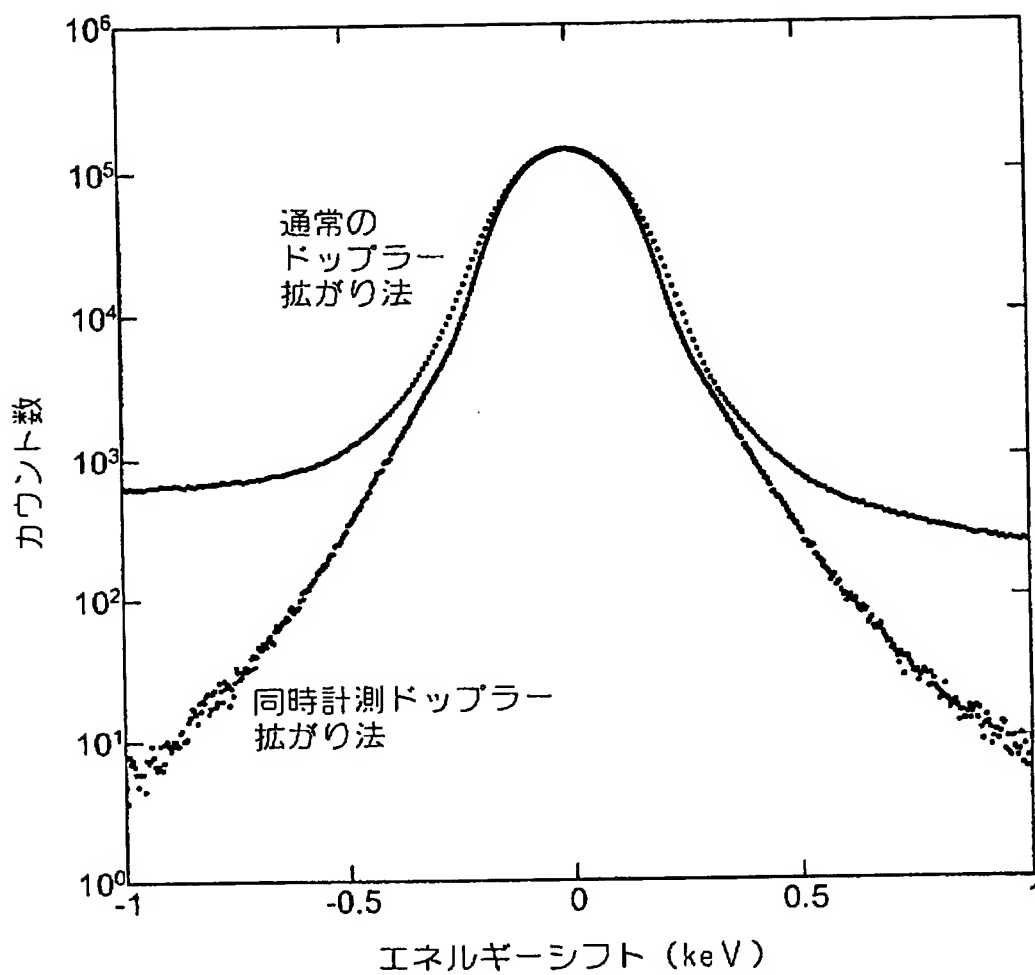
【図 1 1】

図 11

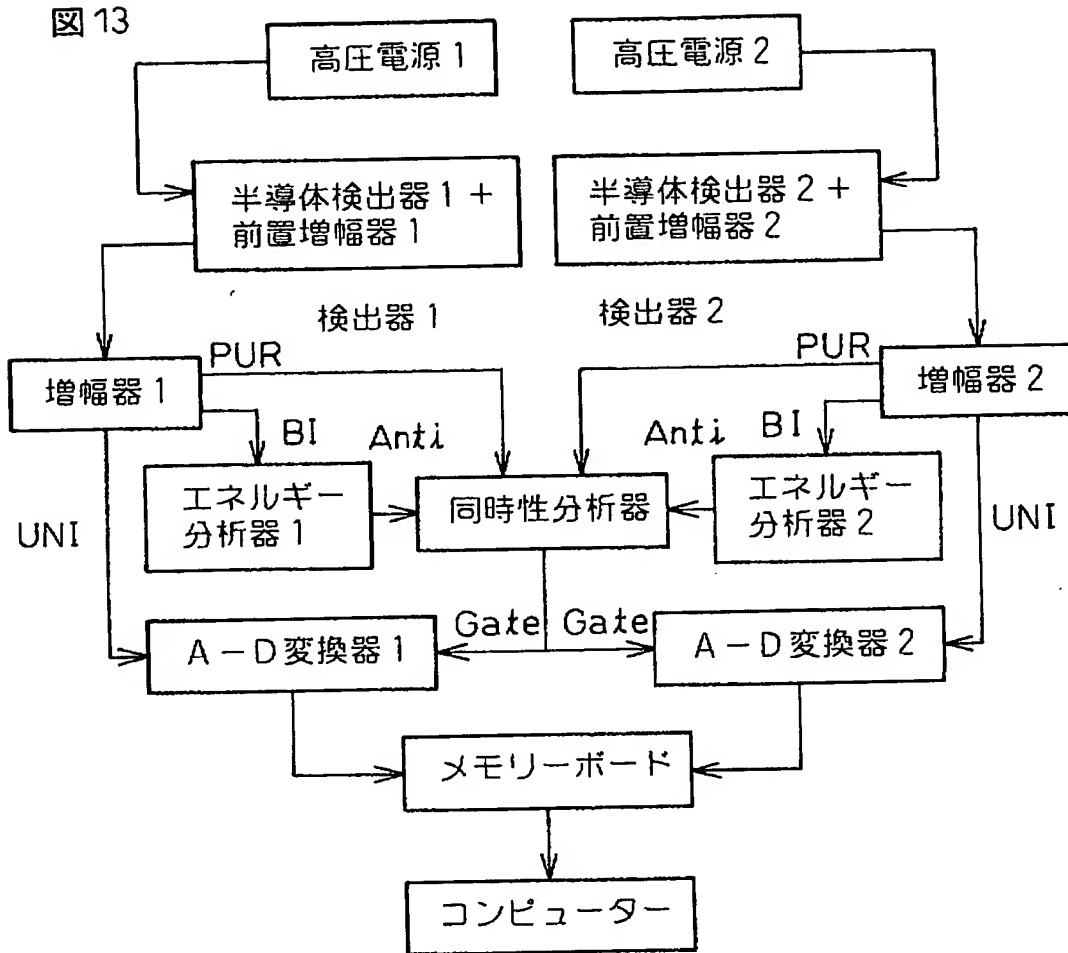


【図 12】

図 12



【図 13】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 陽電子を利用する欠陥評価装置を小型化し、測定精度を改良し、そのメンテナンス頻度を減少させること。

【解決手段】 陽電子を発生する線源と前記陽電子を低速化するためのモデレーターを有する線源部と、前記線源部から試料保持部まで陽電子を輸送する輸送部と、被測定試料を保持する試料保持部と、前記被測定試料から放出される γ 線を検出する検出手段を具備する欠陥評価装置において、前記線源部内に後記保護手段がなければ前記線源を熱的に損傷する恐れがある位置に前記モデレーターを加熱する加熱手段を有し、かつ、前記加熱手段を用いて前記モデレーターを加熱する際に前記加熱手段及び加熱されている前記モデレーターから前記線源を保護する保護手段を有することを特徴とする欠陥評価装置。

【選択図】 図 4

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[396023993]

1. 変更年月日 2001年 3月23日

[変更理由] 住所変更

住 所 神奈川県横浜市港北区新横浜3丁目17番地2 友泉新横浜ビ
ル6階

氏 名 株式会社半導体理工学研究センター